

# *Estudio Técnico de Factibilidad del Acople de una Planta Térmica de Desalinización de Aguas al Reactor Nuclear CAREM 25*

María Cecilia Conti<sup>1</sup>, Santiago Labollita<sup>2</sup>, Mauricio Chocrón<sup>3</sup> y Silvia Halpert<sup>4</sup>

Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Libertador 8250 (1429) Buenos Aires, Argentina,  
mconti@cnea.gov.ar<sup>1</sup>, labollita@cae.cnea.gov.ar<sup>2</sup>, chocrón@cnea.gov.ar<sup>3</sup>, halpert@cnea.gov.ar<sup>4</sup>

**Resumen** - La central CAREM tiene un gran potencial para ser utilizada como fuente de energía eléctrica a la red y fuente térmica en la producción de agua potable o industrial. El CAREM25 es el primer prototipo de reactor desarrollado íntegramente en nuestro país capaz de generar 25 MWe. En este trabajo se analiza la factibilidad de acoplar una planta térmica de desalinización de agua a esta Central evaluando su incidencia en el desempeño del Ciclo Secundario. Se realiza el análisis de las condiciones del sistema de acople, la cantidad de agua producida por la planta desaladora, la potencia eléctrica entregada a la red y el consumo energético específico de la planta de desalinización. Con los esquemas de acople propuestos es posible alcanzar una producción de agua desmineralizada de 4000-4300 m<sup>3</sup>/día con una consecuente disminución de potencia eléctrica entregada a la red de 3,5 MW a máxima producción de agua.

**Palabras claves:** desalinización nuclear; aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear; reactor nuclear CAREM 25

**Abstract** - CAREM Nuclear Power Plant has a great potential to produce both electricity and potable or industrial water. CAREM25 is the first reactor prototype completely developed in Argentina. This reactor is able to generate 25MW. This study analyses the feasibility of coupling a desalination thermal plant to CAREM25 NPP, evaluating its effect on the Secondary Cycle performance. It includes the coupling system conditions, the amount of water produced, the final net electricity and the specific energy consumption of the desalination thermal plant. With the coupling schemes proposed it is possible to obtain a 4000-4300m<sup>3</sup>/day of demineralized water. The reduction of power electricity is 3.5 MW at maximum water production.

**Keywords:** nuclear desalination, non-electrical applications of nuclear energy, CAREM 25 nuclear reactor

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial en una notable variedad de actividades domésticas, agrícolas e industriales. En el planeta Tierra se estiman unos 1400 millones de km<sup>3</sup> de agua de los cuales el 97% está constituido por agua salada y el 3% restante corresponde a reservas de agua dulce (El-Dessouky et al., 2002).

Las fuentes de agua dulce disponibles hoy día en el mundo son escasas para garantizar el consumo de agua potable de la población en los próximos años y es por ello que diversos países han comenzado a utilizar sistemas de desalinización de agua de mar para la producción de agua potable como África, Asia y Medio Oriente.

El uso de la energía nuclear para abastecer de energía a dichos procesos resulta en una alternativa confiable y segura como solución.

Actualmente en nuestro país la Comisión Nacional de Energía Atómica (C.N.E.A) lleva en curso el diseño y construcción del primer reactor prototipo de potencia CAREM. El CAREM-25 es un reactor del tipo PWR

(Pressurized Water Reactor- Reactor de Agua a Presión) que generará 25 MWe y se ubicará en la localidad bonaerense de Lima (Boado Magan et al., 2010). Por sus características modulares esta Central tiene un gran potencial para generar en simultáneo electricidad, agua y vapor para procesos industriales de interés.

A nivel internacional el Organismo Internacional de Energía Atómica promueve entre sus países miembros el uso de la energía nuclear en aplicaciones no eléctricas y mantiene diversos foros y congresos internacionales apuntados a su fortalecimiento. La República Argentina ha participado de ellos con importantes contribuciones en el tema (Masrera et al., 2005, Gómez de Soler et al., 2007, Chocrón et al., 2013).

En este trabajo se presenta el análisis técnico del acople de una planta de desalinización térmica a un reactor tipo CAREM-25. La producción de agua se da en cogeneración, es decir que la Central produce electricidad y agua potable en simultáneo.

El objetivo de este trabajo es analizar las diversas formas en que se puede extraer vapor de la Central para proveer de calor a una planta de desalinización térmica tipo MED (Multi Effect Distillation - Destilación Múltiple Efecto).

El rendimiento de la planta MED se evaluó con la variable GOR definida como:

$$GOR = \frac{Q_{demi}}{m_{vapor}}$$

donde  $Q_{demi}$  son los kg de agua desmineralizada producida y  $m_{vapor}$  los kg de vapor consumido como fuente de calor.

El vapor de alimento a la planta MED se extrae del Circuito Secundario (CS) de la Central. El estudio de acople se realizó en estado estacionario sin tener en cuenta en esta primera etapa aspectos económicos ni referentes a seguridad nuclear en transientes operacionales.

La herramienta de cálculo utilizada para este trabajo fue el Software de simulación de procesos CHEMCAD.

En este trabajo se describe brevemente el CSC en el cual se basó el estudio y las condiciones operativas más relevantes del sistema de acople adoptado entre el CS y la planta desaladora.

Previo a la discusión de resultados se presentan los diferentes esquemas de acople propuestos y estudiados.

## DESARROLLO

### *Descripción general del acople entre la planta desaladora y la central*

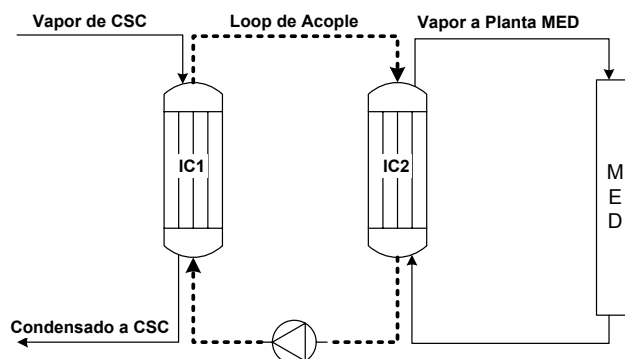
El acople de un sistema MED al reactor CAREM-25 consiste en aprovechar una de las líneas de extracción de vapor de turbina como fuente térmica para llevar a cabo el proceso de desalinización. En menor medida se utiliza parte de la energía eléctrica generada por el CS para abastecer los dispositivos de bombeo propios de la planta desaladora.

Con el objetivo de transportar el calor necesario para el proceso de desalinización desde el Circuito Secundario hacia la planta desaladora se propone el uso de un circuito hidráulico de acople entre ambas formado por un condensador IC1 y un generador de vapor IC2 en serie constituyendo lo que se denomina circuito intermedio o de acople.

La implementación de un circuito en fase líquida a alta presión sigue los lineamientos establecidos por IAEA por razones de seguridad (International Atomic Energy Agency, 2007). El fundamento principal es generar un gradiente de presión inverso al sentido de circulación de calor de manera de evitar que alguna falla en IC1 pudiera hacer entrar en contacto el agua del Circuito Secundario con la planta desaladora.

En la Fig. 1 se presenta un esquema sencillo del circuito de acople descrito.

En este sistema de acople el vapor derivado de la extracción de turbina es dirigido al condensador IC1



**Figura 1** - Esquema simplificado del circuito de acople entre la planta desaladora y Circuito Secundario de la Central

donde entrega su calor al agua presurizada del circuito intermedio. El condensado de IC1 retorna al Circuito Secundario reinyectándose como agua líquida.

El punto de reinyección del condensado al Circuito Secundario puede variar incidiendo de diferente forma en el desempeño de la Central.

El calor entregado al agua del circuito de acople es descargado a otro sistema en el generador de vapor IC2. Aquí se produce el vapor que sirve de fuente de calor para mover el proceso de destilación MED.

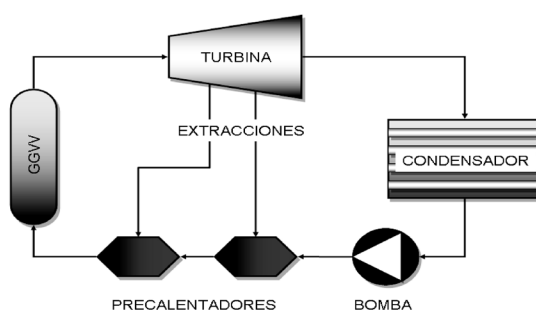
### **Circuito Secundario de la Central**

El Circuito Secundario de la Central es un ciclo Rankine constituido por los siguientes componentes principales: 1) Generadores de vapor (GGVV), 2) Turbina de vapor de dos extracciones, 3) Condensador principal, 4) Bombas principales de condensado, 5) Precalentadores.

El esquema del ciclo térmico se muestra en la Fig. 2. Las principales variables de procesos se detallan en la Tabla 1.

### **Esquemas de acople estudiados**

La extracción de vapor de turbina de baja temperatura representa el punto de extracción de vapor para



**Figura 2** - Circuito Secundario de la Central

Presión de vapor vivo [bar]	47
Temperatura vapor vivo [°C]	316
Caudal de vapor vivo [kg/s]	43
Temperatura de vapor (extracción de baja de Turbina) [°C]	135,5
Caudal extracción de baja de Turbina [kg/s]	5,33

**Tabla 1** - Principales variables de procesos

alimentar el circuito de acople.

Debido a la presión a la que se encuentra dicha extracción de vapor se focalizó el estudio de los diferentes esquemas de acople en dos puntos factibles para reinyectar el condensado proveniente de IC1:

**ESQUEMA A:** El condensado de IC1 se reinyecta en el Condensador principal.

**ESQUEMA B:** El condensado de IC1 se reinyecta en el Tanque de Agua de Alimentación.

### **Estudio de acople. ESQUEMA A - Condensador Principal**

Como primer estudio de acople se analizó la opción de tomar vapor de la extracción de baja de turbina para condensarlo en IC1 y devolver dicho condensado al Condensador Principal del CS.

El calor generado en la condensación se transfiere a IC2 para producir vapor de 80°C que alimenta a la planta MED. El agua condensada de IC1 retorna en condición subenfriada a 95°C.

### **Estudio de acople: OPCION B - Tanque Agua de Alimentación**

El segundo esquema de acople propone tomar vapor de la extracción de baja de turbina, condensarlo en IC1 y devolver dicho condensado al Tanque de Agua de Alimentación del CS en dos condiciones diferentes:

B.1 Líquido saturado a 135°C.

B.2 Líquido subenfriado a 95°C.

El vapor generado en IC2 tiene una temperatura de 80°C.

### **Variables estudiadas**

Con estos dos esquemas de acople (A y B) y con la utilización del software CHEMCAD se estimó en cada caso las siguientes variables de proceso: 1) Balance de masa y energía de las principales líneas del circuito de acople, 2) Potencia eléctrica entregada a la red ( $POT_e$ ), 3) Producción de agua desmineralizada por la planta desaladora. ( $Q_{demi}$ ), 4) Consumo eléctrico específico de la planta desaladora (CEE), 5) Cantidad de habitantes abastecidos de agua (ha), 6) Cantidad de habitantes abastecidos de energía eléctrica (he).

Para la estimación de la producción de agua desmineralizada se consideró:

$$GOR = 10:1$$

Este valor, según la bibliografía consultada (Eltawil et al., 2009, Gude et al., 2010, Al-Karaghoul et al.,

2013), es representativo de una planta MED típica.

Para la estimación de la cantidad de habitantes abastecidos de agua y electricidad se consideraron los siguientes consumos per- cápita:

- Consumo eléctrico = 0,3 kW
- Consumo de agua = 0,2 m<sup>3</sup>/día

El consumo de energía necesario para alimentar el proceso de desalinización es una variable de interés pues permite comparar diferentes tecnologías a partir de su incidencia en la generación eléctrica de la Central.

En este estudio se definió la siguiente variable representativa:

$$CEE \left[ \frac{kWh}{m^3} \right] = \frac{\Delta POT_e}{Q_{demi}}$$

Definido así, el CEE representa el consumo de energía eléctrica necesario para producir un metro cúbico de agua desmineralizada. Se considera como tal al consumo eléctrico para bombeo y la disminución de energía eléctrica generada producto de la extracción de calor.

Se calculó el rendimiento relativo del ciclo térmico como indicador de la incidencia de la extracción de vapor sobre el Circuito Secundario. Se definió como:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{c/extracción}}{\eta_{s/extracción}}$$

## RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación corresponden al estudio de los dos esquemas de acople mencionados en tres puntos de operación diferentes. Esto es:

1. Punto de diseño del Circuito Secundario (sin derivación de vapor).
2. Derivación del 50% del vapor de la extracción de turbina (k=0,5).
3. Derivación total del vapor de la extracción de turbina (k=1).

### Resultados Ciclo térmico

En la Tabla 2 y Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos bajo el esquema de acople A en el que se devuelve el condensado de IC1 al Condensador Principal en condición subenfriado.

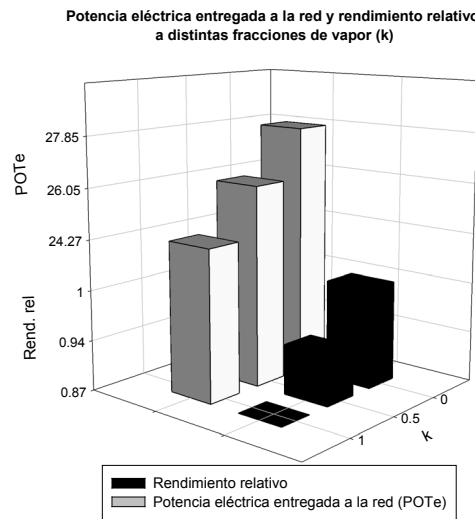
En la Tabla 3 y Fig. 4 se muestran los resultados del esquema de acople B.1 en el que se devuelve el condensado de IC1 al Tanque de Agua de Alimento en condición saturado (135,5 °C).

En la Tabla 4 y Fig. 5 se muestran los resultados de la extracción de vapor bajo el esquema B.2 en el que se devuelve el condensado de IC1 al Tanque de Agua de Alimento en condición subenfriado (95°C).

Puede observarse que la incidencia de la extracción de vapor es similar en los tres esquemas planteados aunque levemente mayor en el caso en que se devuelve el condensado al Condensador Principal (Esquema A).

$k$	$POT_e$ [MWe]	$\eta_{rel}$
0	27,85	1
0,5	26,05	0,94
1	24,27	0,87

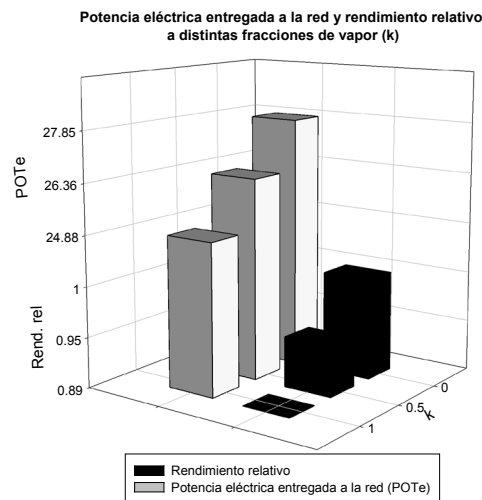
**Tabla 2** - Incidencia de la extracción de vapor en el rendimiento del CS. Esquema A



**Figura 3** - Incidencia del esquema A en el CS

$k$	$POT_e$ [MWe]	$\eta_{rel}$
0	27,85	1
0,5	26,36	0,95
1	24,88	0,89

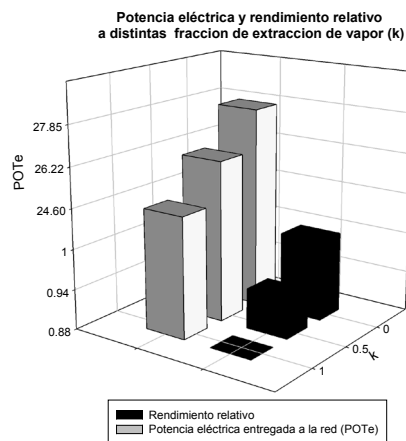
**Tabla 3** - Incidencia de la extracción de vapor en el rendimiento del CS. Esquema B.1



**Figura 4** - Incidencia del esquema B.1 en el CS

$k$	$POT_e$ [MWe]	$\eta_{rel}$
0	27,85	1
0,5	26,22	0,94
1	24,60	0,88

**Tabla 4** - Incidencia de la extracción de vapor en el rendimiento del CS. Esquema B.2



**Figura 5** - Incidencia del esquema B.2 en el CS

### Resultados planta desaladora-circuito de acople

A continuación se muestran las variables relacionadas con el rendimiento de la planta desaladora propuesta: potencia térmica entregada a la planta desaladora ( $POT_t$ ), producción de agua ( $Q_{demi}$ ) y el consumo específico de energía en la producción de agua (CEE).

En la Tabla 5 se observan los resultados para el esquema de acople A.

$k$	$POT_t$ [MWt]	$Q_{demi}$ [m <sup>3</sup> /día]	CEE [kWh/m <sup>3</sup> ]
0,5	5,84	2186	21,76
1	11,68	4372	21,65

**Tabla 5** - Resultados planta desaladora-circuito de acople para el Esquema A

En la Tabla 6 se muestran las mismas variables calculadas para el esquema de acople B.1.

$k$	$POT_t$ [MWt]	$Q_{demi}$ [m <sup>3</sup> /día]	CEE [kWh/m <sup>3</sup> ]
0,5	5,38	2013	19,76
1	10,76	4027	19,70

**Tabla 6** - Resultados planta desaladora-circuito de acople para el Esquema B.1

En la Tabla 7 se presentan las mismas variables para el esquema de acople B.2.

$k$	$POT_t$ [MWt]	$Q_{demi}$ [m <sup>3</sup> /día]	CEE [kWh/m <sup>3</sup> ]
0,5	5,84	2186	19,90
1	11,68	4372	19,84

**Tabla 7** - Resultados planta desaladora-circuito de acople para el Esquema B.2

Puede observarse que el consumo energético del Esquema de acople A es mayor que el que se obtiene en los esquemas B.1 y B.2. Esto es consecuencia de la mayor incidencia en el rendimiento del ciclo térmico. Sin embargo la producción de agua desmineralizada está ligada al calor intercambiado en IC1 y no al esquema de acople que se utilice.

### **Población abastecida de Agua y Electricidad**

Finalmente se estimó la cantidad de habitantes que es posible abastecer de agua (ha) y electricidad (he) en la condición de máxima extracción de vapor.

	Habitantes
Agua	21.860
Electricidad	82.000

**Tabla 8** - Cantidad de habitantes abastecidos de agua y electricidad

## **CONCLUSIONES**

Se realizó el estudio de factibilidad del acople de una planta de desalinización térmica a una Central tipo CAREM-25.

Se propuso la utilización del vapor proveniente de la extracción de baja de turbina del Circuito Secundario para la producción de agua desmineralizada mediante una planta MED típica.

Se evaluaron dos esquemas de acople entre el Circuito Secundario y el circuito de acople. Se encontró que el rendimiento de la central bajo estos esquemas difiere en menos de 3%.

Se evaluaron parámetros indicadores del rendimiento del ciclo térmico, la producción de agua aproximada y el desempeño de la Central en Cogeneración.

Es factible alcanzar una producción de agua desmineralizada de 4000-4300 m<sup>3</sup>/día capaz de abastecer a una población de aproximadamente 22.000 habitantes.

La disminución de generación eléctrica entregada a la red para la máxima producción posible de agua es de 3,5 MWe lo que permite abastecer de electricidad a una población de 82.000 habitantes.

La reinyección del condensado de IC1 en el Condensador Principal da como resultado un consumo eléctrico específico de 21,6 kWh/m<sup>3</sup> frente a un consumo de 19,7 kWh/m<sup>3</sup> para el esquema B.2.

## **REFERENCIAS**

- El-Dessouky, Ettouney, "Fundamentals of Salt Water Desalination", First Edition, Elsevier, 2-3, (2002).  
Boado Magan, Delmastro, Markiewicz, Lopasso, Diez, Giménez, Rauschert, Halpert, Chocrón, Dezzutti, Pirani, Balbi, Fittipaldi, Schlamp, Murmis, Lis, "Project Report. CAREM Project Status", Hindawi Publishing Corporation



*Science and Technology of Nuclear Installations*, (2010).

Masriera, Doval, "Evaluation of nuclear desalination coupled systems", IAEA Tecdoc 1444, 183-200, (2005).

Gómez de Soler, Ramilo, Castellano, Coppari, Cabrera, "Assessment of nuclear desalination projects in Argentina and Latin America, Atomic Energy National Commission", IAEA Tecdoc 1561, 89-104, (2007).

Chocrón, Conti, Labollita, Halpert, "Current activities related with non-electric applications of nuclear energy in Argentina", Meeting of the Technical Working Group on Nuclear Desalination, International Atomic Energy Agency, Vienna, 23-25, (January 2013).

International Atomic Energy Agency, "Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specifics Studies", IAEA Tecdoc 1561, 145-146, (2007).

Eltawil, Zhengming, Yuan, "Review of renewable energy technologies integrated with desalination systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2245-2262, (2009).

Gude, Nirmalakhandan, Deng, "Renewable and sustainable approaches for desalination", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2641-2654, (2010).

Al-Karaghoul, Kazmerski, "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 343-356, (2013).